超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响

杜明芳　程业飞　裴付伟　陈凌杰　温　超　周岩民*

（南京农业大学动物科技学院，南京 210095）

摘　要：本试验旨在研究超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响。选取 1 日龄爱拔益加肉鸡 192 只，随机分成 3 组，每组 8 个重复，每个重复 8 只。对照组饲喂基础饲粮，2 个试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 1%常规粉碎凹凸棒石、1%超微粉碎凹凸棒石的试验饲粮，试验期为 42 d。结果表明：与对照组相比，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石或超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉常量化学成分均无显著影响（P>0.05）；饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石显著降低了腿肌中铬和镉的含量（P<0.05），显著提高了胸肌中铁的含量（P<0.05），并显著降低了胸肌和腿肌红度值以及胸肌黄度值（P<0.05）；饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石则仅显著降低了腿肌中铬的含量和胸肌红度值（P<0.05）。与对照组和常规粉碎凹凸棒石组相比，超微粉碎凹凸棒石组胸肌谷胱甘肽过氧化物酶活性显著提高（P<0.05）。由此得出，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石能减少肌肉中有毒重金属残留，影响肌肉色度，提高胸肌的抗氧化能力，且效果优于常规粉碎凹凸棒石。

关键词：超微粉碎；常规粉碎；凹凸棒石；肉鸡；常量化学成分；金属元素沉积；肌肉品质；抗氧化能力

中图分类号：S816　　　　　　文献标识码：A　　　　　　　文章编号：

为消费者提供安全、优质的动物性食品是养殖业的首要目标，保障动物产品安全的相关技术措施已成为研究重点之一。凹凸棒石（palygorskite）是一种含水镁铝硅酸盐黏土矿物，为凹凸棒石黏土的主要组分，其独特的纤维状晶体结构和孔道等微观结构赋予凹凸棒石良好

收稿日期：2017-11-20
基金项目：凹凸棒石黏土功能性饲料产品研发（201501）
作者简介：杜明芳（1992—），女，河北石家庄人，硕士研究生，动物营养与饲料科学专业。E-mail： kyungsoo1992@163.com
*通信作者：周岩民，教授，博士生导师，E-mail: zhouym6308@163.com

的吸附性、离子交换性等特性[1]。体外研究表明，凹凸棒石可有效吸附污染水体和土壤中的重金属离子[2-3]，且已作为重金属吸附材料广泛应用于污水处理、医药、化工等领域[4]。在动物生产中，Cheng 等[5]研究发现，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石可降低肉鸡肌肉中铅（Pb）的残留。Cheng 等[6]报道，在 Pb 污染饲粮中添加 1%的常规粉碎凹凸棒石可降低肉鸡肝脏、肾脏和胸肌中 Pb 和铜（Cu）的含量。Zhang 等[7]亦报道，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石减少了团头鲂肌肉中镉（Cd）的沉积。此外，饲粮中添加凹凸棒石还可促进动物生长，改善动物肠道健康和机体抗氧化能力[8-9]，且添加量以 1%为宜[5,9-10]。

超微粉碎技术是利用机械或流体动力等方法将大颗粒物料粉碎成微米甚至纳米级微粒的过程[11]。与常规粉碎相比，超微粉碎后的产品具有粒径分布均匀、比表面积显著增大和表面吸附力较强等理化特性[12]。黏土类矿物具有良好的吸附性，并且吸附性能受其粒径大小影响，颗粒粒径越小，比表面积越大，吸附能力越强[13]。Zhao 等[14]体外研究表明，超微粉碎处理后的凹凸棒石对重金属的清除能力显著提高。Berhane 等[15]也发现，随着凹凸棒石-蒙脱石复合物颗粒粒径的降低，其对抗生素环丙沙星等化合物的吸附力不断增强。

目前，动物生产中所用的凹凸棒石以常规粉碎产品为主。本实验室前期的研究表明，常规粉碎凹凸棒石的添加可降低肌肉中有毒重金属的沉积[5-7]，也可能影响肉色和肉质[5-6]，但有关饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响尚未见报道。鉴于此，本试验拟在肉鸡饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石，研究其对肉鸡肌肉常量化学成分、金属沉积、肉品质及其抗氧化功能的影响，以期为超微粉碎凹凸棒石在肉鸡饲粮中的合理应用提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验所用常规粉碎凹凸棒石购自江苏惠达矿业科技有限公司。采用超微粉碎分级机（TC-40 型，南京龙立天目超微粉体技术有限公司）对部分常规粉碎凹凸棒石进行超微粉碎，制成超微粉碎凹凸棒石。通过激光粒度仪（MASTERSIZER 2000 型，英国马尔文仪器有限

公司）对 2 种粉碎处理的凹凸棒石进行粒径分析，结果见表 1。

表 1　凹凸棒石粒径

Table 1　Particle sizes of palygorskite　　μm

项目 Items	D（0.1）	D（0.5）	D（0.9）
常规粉碎凹凸棒石 Regular grinding palygorskite	1.95	13.09	74.83
超微粉碎凹凸棒石 Ultra-fine grinding palygorskite	1.00	3.53	9.37

D 为颗粒众数直径，D（0.1）、D（0.5）、D（0.9）分别表示该等效直径的颗粒占被测量的 10%、50%和 90%的比例。

D represented mode diameter of particle. D(0.1), D(0.5) and D(0.9) indicated that particle size of the cumulative particle size distribution of a sample to reach 10%, 50% and 90%, respectively.

1.2　试验设计

试验选取 192 只 1 日龄爱拔益加（AA）肉鸡，公母各占 1/2，随机分为 3 组，每组 8 个重复，每个重复 8 只鸡。肉鸡饲养于多层鸡笼中，每笼为 1 个重复，重复之间体重接近。对照组饲喂基础饲粮，常规粉碎凹凸棒石组饲喂基础饲粮+1%常规粉碎凹凸棒石，超微粉碎凹凸棒石组饲喂基础饲粮+1%超微粉碎凹凸棒石。试验在南京市康欣禽业有限公司进行，肉鸡饲养在封闭鸡舍。试验期为 42 d，期间肉鸡自由采食和饮水，24 h 连续光照，肉鸡的免疫程序按照常规进行。基础饲粮组成及营养水平见表 2。

表 2　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2　Composition and nutrient levels of basal diets (air-dry basis)　　%

项目 Items	含量 Content

	1~21 日龄 1 to 21 days of age	22~24 日龄 22 to 24 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	57.00	62.00
豆粕 Soybean meal	32.60	28.00
玉米蛋白粉 Corn protein meal	3.00	2.00
豆油 Soybean oil	3.00	4.00
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	2.00	1.60
石粉 Limestone	1.23	1.30
L-赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys•HCl	0.32	0.31
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.15	0.11
食盐 NaCl	0.30	0.30
预混料 Premix[1)]	0.40	0.38
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels		
代谢能 ME/(MJ/kg)[2)]	12.55	12.98
粗蛋白质 CP	21.55	19.33
赖氨酸 Lys	1.22	1.10
蛋氨酸 Met	0.50	0.43
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.90	0.72
钙 Ca	1.01	0.93
有效磷 AP	0.46	0.39

1) 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets：VA 12 000 IU，VD_3 3 000 IU，VE 30 IU，VK_3 1.3 mg，VB_1 2.2 mg，VB_2 8 mg，VB_6 4 mg，VB_{12} 0.013 mg，烟酸 nicotinic acid 40 mg，氯化胆碱 choline chloride 400 mg，*D*-泛酸钙 *D*-pantothenic acid 10 mg，生物素 biotin 0.04 mg，叶酸 folic acid 1 mg，Fe 80 mg，Cu 7.5 mg，Mn 110 mg，Zn 65 mg，I 1.1 mg，Se 0.3 mg。

2) 代谢能为计算值，其余为实测值。ME was a calculated value, while the others were measured values.

1.3 试验仪器

HI−9125 型 pH 计（portable pH meter）购自意大利 HANNA Instruments 公司；CR−10 型色差仪（colorimeter）购自日本 Konica Minolta 公司；ZKSY−600 智能恒温型水浴锅（thermostat water bath）购自上海浦东荣丰科学仪器有限公司；EHD−36 型消解仪（heating block）购自北京莱伯泰科仪器股份有限公司；Optima−2100 DV 型电感耦合等离子体质谱仪（inductively coupled plasma mass spectrometry，ICP-MS）购自美国 Perkin Elmer 公司；5804−R 型台式低温离心机（refrigerated centrifuge）购自德国 Eppendorf 公司；PK−02200D 型匀浆机（homogenizer）购自美国 Pro Science 公司。

1.4 样品采集

于试验第 42 天每重复选取 1 只体重相近、健康状况良好的公鸡，颈动脉放血致死后进行样品采集。肉鸡解剖后，取肉鸡左侧部分胸肌、腿肌于自封袋，于−20 ℃保存备用。同时取右侧全部胸肌、腿肌样品于 4 ℃下保存，用于测定肌肉品质。

1.5 测定指标及方法

1.5.1 肌肉常量化学成分测定

肌肉中水分、粗脂肪、粗蛋白质含量的测定分别参照《食品中水分的测定》[16]（GB 5009.3-2016，直接干燥法）、《食品中脂肪的测定》[17]（GB 5009.6-2016，索氏抽提法）、《食

品中蛋白质的测定》[18]（GB 5009.5-2016，凯氏定氮法）进行测定。

1.5.2　肌肉金属元素含量测定

胸肌、腿肌样品电热消解参照 Yang 等[19]的方法。准确称取 2 g 肌肉样品，置于 50 mL 平底柱型消解管中，加入 10 mL 硝酸-高氯酸混合酸（$V_{硝酸}/V_{高氯酸}$=4:1），样品静置过夜后置于消解仪消解至透明，冷却后过滤至 25 mL 容量瓶中，利用 ICP-MS 测定样品中锌（Zn）、铁（Fe）、镁（Mg）、Cu、Cd 和铬（Cr）的含量。消解仪设定程序为：90 ℃，30 min；120 ℃，30 min；160 ℃，30 min；180 ℃，180 min。ICP-MS 工作条件为：高频发射功率 1 550 W；等离子气流量 12 L/min；辅助气流量 0.2 L/min；雾化气流量 0.55 L/min；样品提升量 1.0 mL/min。

1.5.3　肌肉品质指标测定

1.5.3.1　pH

用 pH 计测定屠宰后 45 min 和 4 ℃冷藏 24 h 后肌肉样品的 pH，每个样品测定 3 次，取其平均值。

1.5.3.2　色度

用色差仪测定屠宰后 45 min 肌肉样品的亮度（L^*）、红度（a^*）和黄度（b^*）值，每个样品测定 3 次，取其平均值。

1.5.3.3　滴水损失

滴水损失参照王晓明[20]的方法测定。肉鸡屠宰后，称取肌肉样品 10 g（W_1），在一次性纸杯中装置可悬挂回形针的铁丝，用回形针将肌肉悬挂于铁丝上，保证肉样不接触纸杯内壁且肌纤维方向与重力方向平行，纸杯外套自封袋，封口后于 4 ℃恒温放置，分别于 24 h、48 h 后取出，吸水纸轻轻擦去表层汁液后称重（W_2、W_3）。计算公式如下：

滴水损失 24 h（%）=$[(W_1-W_2) / W_1]\times100$；

滴水损失 48 h（%）=$[(W_1-W_3) / W_1]\times100$。

1.5.3.4　蒸煮损失

蒸煮损失参照王晓明等[20]的方法测定。宰后所取的肌肉样品于 4 ℃冰箱熟化 24 h，称取肌肉样品 10 g（W_4），装入自封袋，用玻璃温度计插入肌肉中心部位，再扎好袋口。将肌肉放入水浴锅中加热至肌肉中心温度达 70 ℃，维持温度 20 min。取出肉样冷却后擦干，称重（W_5）。计算公式如下：

蒸煮损失 48 h（%）=$[(W_4-W_5)/W_4]\times100$。

1.5.4　肌肉抗氧化能力测定

组织匀浆液制备：称取 0.3 g 肌肉样品与 4 ℃预冷的灭菌生理盐水按照比例 1:9（质量体积比）混合后匀浆，匀浆液于 4 ℃、3 500 r/min 离心 10 min，取上清液分装，于−20 ℃下保存待测。

取上述组织匀浆上清液，按照试剂盒说明所述方法测定肌肉总超氧化物歧化酶（total superoxide dismutase,T-SOD）与谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase, GSH-Px）活力、丙二醛（malondialdehyde,MDA）含量和总抗氧化能力（total antioxidant capacity,T-AOC）。上述指标测定所用试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.5　数据统计分析

试验数据采用 Excel 2010 进行初步整理，采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），并采用 Duncan 氏法多重比较检验组间差异显著性，以 $P<0.05$ 为显著差异，试验结果以平均值±标准误（mean±SE）表示。

2　结　果

2.1　超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉常量化学成分的影响

由表 3 可知，与对照组相比，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石或超微粉碎凹凸棒石对肉鸡胸肌和腿肌中水分、粗脂肪和粗蛋白质含量均无显著影响（$P>0.05$）。

表 3　超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉常量化学成分的影响

Table 3 Effects of ultra-fine grinding palygorskite on muscular macrochemical components of broilers %

项目 Items	对照组 Control group	常规粉碎凹凸棒石组 Regular grinding palygorskite group	超微粉碎凹凸棒石组 Ultra-fine grinding palygorskite group
胸肌 Breast muscle			
水分 Moisture	74.31±0.24	74.85±0.40	74.81±0.34
粗脂肪 Ether extract	1.06±0.25	1.04±0.27	1.01±0.17
粗蛋白质 Crude protein	23.90±0.14	23.27±0.38	23.61±0.34
腿肌 Thigh muscle			
水分 Moisture	76.35±0.35	76.11±0.44	76.13±0.65
粗脂肪 Ether extract	2.85±0.29	2.92±0.28	3.13±0.30
粗蛋白质 Crude protein	19.78±0.16	19.95±0.36	19.44±0.33

同行数据肩标不同字母表示差异显著（P<0.05），无字母或相同字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同。

In the same row, values with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.2 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉金属元素沉积的影响

由表 4 可知，与对照组相比，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石显著降低了腿肌中 Cd 和

Cr 的含量（*P*<0.05），并显著提高了胸肌中 Fe 含量（*P*<0.05）；饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石则仅显著降低腿肌中 Cr 的含量（*P*<0.05）。此外，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石较添加常规粉碎凹凸棒石显著提高肌肉中 Fe 的含量（*P*<0.05）。

表 4　超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉金属元素沉积的影响

Table 4　Effects of ultra-fine grinding palygorskite on muscular mineral accumulations of broilers

mg/kg

项目 Items	对照组 Control group	常规粉碎凹凸棒石组 Regular grinding palygorskite group	超微粉碎凹凸棒石组 Ultra-fine grinding palygorskite group
胸肌 Breast muscle			
锌 Zn	6.80±0.22	6.71±0.22	7.38±0.13
铁 Fe	5.99±0.20^{b}	6.02±0.20^{b}	7.44±0.39^{a}
镁 Mg	399.59±8.72	377.85±7.94	397.69±8.32
铜 Cu	0.63±0.02	0.59±0.02	0.60±0.02
镉 Cd	0.035±0.001	0.033±0.001	0.032±0.001
铬 Cr	0.67±0.05	0.58±0.02	0.65±0.05
腿肌 Thigh muscle			
锌 Zn	12.85±1.38	12.78±0.91	15.56±1.15
铁 Fe	8.33±0.69^{ab}	7.06±0.30^{b}	9.39±0.65^{a}
镁 Mg	274.47±5.95	289.31±6.80	292.99±6.98
铜 Cu	0.68±0.02	0.64±0.03	0.64±0.02
镉 Cd	0.069±0.002^{a}	0.062±0.001^{a}	0.042±0.002^{b}

铬 Cr	0.73±0.10^{a}	0.47±0.05^{b}	0.48±0.02^{b}

2.3 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响

由表 5 可知，与对照组相比，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石显著降低了胸肌和腿肌 a* 值以及腿肌 b*值（P<0.05）；饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石亦显著降低了胸肌 a*值（P<0.05）；但饲粮中无论是添加超微粉碎凹凸棒石还是常规粉碎凹凸棒石，对肉鸡胸肌和腿肌 pH（45 min 和 24 h）、滴水损失（24 h 和 48 h）、蒸煮损失和 L*值均无显著影响（P>0.05）。

表 5 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响

Table 5 Effects of ultra-fine grinding palygorskite on musclr quality of broilers

项目 Items	对照组 Control group	常规粉碎凹凸棒石组 Regular grinding palygorskite group	超微粉碎凹凸棒石组 Ultra-fine grinding palygorskite group
胸肌 Breast muscle			
$pH_{45\ min}$	6.35±0.03	6.31±0.05	6.31±0.05
$pH_{24\ h}$	5.81±0.03	5.78±0.03	5.79±0.04
亮度 L*	48.30±0.61	48.96±0.64	47.03±0.68
红度 a*	4.49±0.16^{a}	4.02±0.07^{b}	3.97±0.11^{b}
黄度 b*	14.19±0.61^{a}	14.22±0.46^{a}	12.20±0.45^{b}
24 h 滴水损失 24 h drip loss/%	2.49±0.18	2.63±0.25	2.59±0.22
48 h 滴水损失 48 h drip loss/%	4.66±0.28	4.66±0.18	4.64±0.09
蒸 煮 损 失 Cooking	25.03±0.40	25.20±0.76	24.37±0.60

loss/%			
腿肌 Thigh muscle			
$pH_{45\ min}$	6.28±0.04	6.28±0.03	6.23±0.03
$pH_{24\ h}$	6.20±0.17	6.06±0.13	6.10±0.12
亮度 L*	50.23±0.70	50.62±0.55	51.79±0.51
红度 a*	15.7±0.57[a]	15.25±0.45[a]	13.89±0.45[b]
黄度 b*	14.72±0.45	15.53±0.76	15.04±0.42
24 h 滴水损失 24 h drip loss/%	1.95±0.12	2.08±0.17	2.01±0.13
48 h 滴水损失 48 h drip loss/%	4.67±0.18	4.64±0.11	4.51±0.19
蒸煮损失 Cooking loss/%	22.24±1.14	23.72±1.13	24.19±1.76

2.4 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉抗氧化能力的影响

由表 6 可知，超微粉碎凹凸棒石组胸肌 GSH-Px 活性较对照组和常规粉碎凹凸棒石组显著提高（P<0.05）。与对照组相比，超微粉碎凹凸棒石组和常规粉碎凹凸棒石组胸肌 T-AOC 分别提高了 53.85%和 23.08%，但差异均不显著（P>0.05）。

表 6 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉抗氧化能力的影响

Table 6 Effects of ultra-fine grinding palygorskite on muscular antioxidant capacity of broilers

项目 Items	对照组 Control group	常规粉碎凹凸棒石组 Regular grinding palygorskite group	超微粉碎凹凸棒石组 Ultra-fine grinding palygorskite group

胸肌 Breast muscle			
总超氧化歧化酶 T-SOD/（U/mg prot）	31.18±1.59	33.00±1.45	30.87±1.57
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/（U/mg prot）	24.17±0.87^{b}	25.57±1.13^{b}	28.55±1.32^{a}
总抗氧化能力 T-AOC/（U/mg prot）	0.13±0.01	0.16±0.02	0.20±0.03
丙二醛 MDA/（nmol/mg prot)	0.45±0.11	0.49±0.13	0.40±0.10
腿肌 Thigh muscle			
总超氧化歧化酶 T-SOD/（U/mg prot）	25.32±1.94	27.41±2.03	28.36±2.16
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/（U/mg prot）	10.11±0.84	10.75±1.06	11.64±0.86
总抗氧化能力 T-AOC/（U/mg prot）	0.17±0.01	0.14±0.02	0.15±0.01
丙二醛 MDA/（nmol/mg prot)	0.27±0.06	0.21±0.03	0.23±0.06

3 讨 论

3.1 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉常量化学成分的影响

肉类富含蛋白质、脂肪、矿物质等营养成分，是人类优质蛋白质等营养素的主要来源[21]。肌肉化学成分直接关系到肌肉的营养特性，通常将水分、粗脂肪和粗蛋白质作为肌肉常量化

学成分[22]。Pryvulovuc 等[23]研究表明，在育肥猪饲粮中添加 0.5%以蒙脱石为主的水合铝硅酸盐，可显著提高眼肌水分含量并且显著降低眼肌粗脂肪含量。本试验结果显示，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石或超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉水分、粗蛋白质和粗脂肪含量均无显著影响，与上述结果不一致，这可能与饲养动物品种、黏土矿物的种类和添加量、饲料管理和环境等因素有关。

3.2　超微粉碎凹凸棒石对肉鸡金属元素沉积的影响

有毒重金属 Cr、Cd 等被动物摄取、吸收后可在体内富集，通过食物链进入人体，对人类健康构成威胁。Kong 等[24]体外研究证明，凹凸棒石可有效地吸附溶液中 Cd、Cr 和镍（Ni）等重金属元素。本试验结果显示，饲粮中添加常规粉碎凹凸棒石或超微粉碎凹凸棒石均可降低肉鸡腿肌中 Cr 的残留，这与 Cheng 等[5-6]和 Zhang 等[7]的试验结果相一致。与常规凹凸棒石组相比，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒可显著降低腿肌中 Cd 的残留。周岩民等[25]的研究表明，与粗粒度沸石相比，细粒度沸石使肌肉中 Pb 含量有较大幅度的降低。林飞宏[26]研究发现，在体外不同 pH 条件下，超微粉碎蒙脱石对重金属 Cu 和 Pb 的吸附能力优于蒙脱石原土，因为超微粉碎蒙脱石比表面积增大，吸附能力增强。因此，本试验中超微粉碎凹凸棒石改善肌肉金属元素沉积的效果优于常规粉碎凹凸棒石可能与其比表面积增大有关。

凹凸棒石是一种天然的碱土镁铝硅酸盐矿物，通过动物消化道时，凹凸棒石所含的矿物元素，如 Fe 等，在酸性消化液作用下释放并被动物吸收利用[27]。Zhang 等[7]报道，在团头鲂饲料中添加 2%的常规粉碎凹凸棒石提高了血浆和肌肉中 Fe 的含量。本试验中得到了相似的结果，且超微粉碎凹凸棒石提高胸肌中 Fe 含量的效果要优于常规粉碎凹凸棒石，这可能是由于超微粉碎后的凹凸棒石颗粒粒径更小，可更加充分地与消化液接触，促进了 Fe 的释放，有利于机体对 Fe 的吸收利用，从提高胸肌中 Fe 的含量。研究亦表明，凹凸棒石对金属离子的饱和吸附量为：Cr^{6+}>Cd^{2+}>Fe^{3+}[28-29]，故本试验中超微粉碎凹土棒石降低了肌肉中重金属元素 Cr 和 Cd 的残留，并提高了肌肉中 Fe 的沉积。

3.3 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉品质的影响

肉的食用品质反映了肉品的经济价值，肌肉食用品质的评定指标包括肌肉的系水力、pH值和色度等[21]。肉色是影响消费者购买肉类产品的主要因素，具有重要的商品学意义[30]。Cheng 等[5]研究表明，饲粮中添加 1%的凹凸棒石降低了胸肌 a^*和 b^*值以及腿肌 b^*值，但不影响其他肉品参数。本研究结果表明，饲粮中无论是添加超微粉碎凹凸棒石还是添加常规粉碎凹凸棒石，对肉鸡肌的 a^*和 b^*值均有不同程度的降低，这与上述结果一致。肉鸡玉米-豆粕型饲粮的原料中含有天然类胡萝卜素，如玉米黄质、叶黄素和胡萝卜素等[31]，可影响肉鸡胴体色泽[32]。体外试验证明，凹凸棒石可有效吸附食用油中的色素[33-34]。因此，本试验中凹凸棒石对肌肉 a^*和 b^*值的降低可能与凹凸棒石对色素的吸附相关。此外，与常规粉碎凹凸棒石相比，超微粉碎凹凸棒石对肌肉色度的影响更显著，这可能是由于超微粉碎处理提高了凹凸棒石颗粒的有效吸附面积，进而增强了对饲粮中色素的吸附性能。另外，本试验结果显示，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石或常规粉碎凹凸棒石对肉鸡胸肌和腿肌的系水力和 pH 均无显著影响，这与 Kavan 等[35]的研究结果一致，但杨雪等[36]研究发现饲粮中添加凹凸棒石可显著提高生长育肥猪肌肉 $pH_{45\ min}$ 并降低眼肌 48 h 滴水损失。有关凹凸棒石对肌肉品质影响的报道不一致可能与动物种类、凹凸棒石来源和添加量有关。

3.4 超微粉碎凹凸棒石对肉鸡肌肉抗氧化能力的影响

动物依靠体内的抗氧化防御系统清除过量的活性氧自由基，防止其对机体造成氧化损伤。Chen 等[9]研究表明，饲粮中添加 1%的凹凸棒石可增强肉鸡肠道 T-SOD 活性。黏土矿物能够提高机体抗氧化功能，可能是由于黏土矿物颗粒能够吸附霉菌毒素、重金属、致病微生物等[5-9]，减少有害物质与肠道黏膜的接触，进而缓解组织的氧化应激反应[36]。本试验发现，饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石可显著提高肉鸡胸肌 GSH-Px 活性，但添加常规粉碎凹凸棒石无此效果，表明超微粉碎凹凸棒石有提高肉鸡胸肌抗氧化能力的效果。这可能是由于超微粉碎后的凹凸棒石具有更大的比表面积，能更好地吸附有害物质，减少有害物质造成的机体氧

化应激反应。另外，有研究表明凹凸棒石对机体抗氧化能力的调节与其表面活性基团有关[37]。因此，超微粉碎凹凸棒石提高肌肉抗氧化能力效果优于常规粉碎凹凸棒石，也可能是由于凹凸棒石在超微粉碎过程中，因机械力作用活化凹凸棒石表面，产生新的离子键或活化点[38]。

4 结 论

肉鸡饲粮中添加超微粉碎凹凸棒石可降低肌肉重金属残留，影响肌肉色泽，提高胸肌的抗氧化能力，且效果优于同等添加量的常规粉碎凹凸棒石。

参考文献：

[1] WANG W B,WANG A Q.Recent progress in dispersion of palygorskite crystal bundles for nanocomposites[J].Applied Clay Science,2016,119:18–30.

[2] CAO J S,WANG C,FANG F,et al.Removal of heavy metal Cu (Ⅱ) in simulated aquaculture wastewater by modified palygorskite[J].Environmental Pollution,2016,219:924–931.

[3] XU Y,LIANG X F,XU Y M,et al.Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals:a review[J].Pedosphere,2017,27(2):193–204.

[4] 柴琴琴,呼世斌,刘建伟,等.有机改性凹凸棒石对养猪废水中有机物的吸附研究[J].环境科学学报,2016,36(5):1672–1682.

[5] CHENG Y F,CHEN Y P,LI X H,et al.Effects of palygorskite inclusion on the growth performance,meat quality,antioxidant ability,and mineral element content of broilers[J].Biological Trace Element Research,2016,173(1):194–201.

[6] CHENG Y F,CHEN Y P,WEN C,et al.Evaluation of dietary palygorskite supplementation on growth performance,mineral accumulations,antioxidant capacities,and meat quality of broilers fed lead-contaminated diet[J].Biological Trace Element Research,2017,doi:10.1007/s12011-017-1047-6.

[7] ZHANG R Q,YANG X,CHEN Y P,et al.Effects of feed palygorskite inclusion on pelleting

technological characteristics,growth performance and tissue trace elements content of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J].Applied Clay Science,2015,114:197–201.

[8] ZHANG J M,LV Y F,TANG C H,et al.Effects of dietary supplementation with palygorskite on intestinal integrity in weaned piglets[J].Applied Clay Science,2013,86:1815–189.

[9] CHEN Y P,CHENG Y F,LI X H,et al.Dietary palygorskite supplementation improves immunity,oxidative status,intestinal integrity,and barrier function of broilers at early age[J].Animal Feed Science and Technology,2016,219:200–209.

[10] CHEN Y P,CHENG Y F,YANG W L,et al.An evaluation of palygorskite inclusion on the growth performance and digestive function of broilers[J].Applied Clay Science,2016,129:1–6.

[11] LIU H P,ZHANG L Y,CHEN T P,et al.Experimental study on the fluidization behaviors of the superfine particles[J].Chemical Engineering Journal,2015,262:579–587.

[12] 陈如,何玲.超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J].食品科学,2017,38(13):150–154.

[13] TU Y,KUNG J,MCCRACKEN T,et al.Effect of clay particle size on the adsorption of a pentane insoluble bitumen fraction[J].Clay Science,2006,12(Suppl.2):194–198.

[14] ZHAO D F,LI M H,XIE J S.Effect of mechanochemical reaction on palygorskite in adsorption properties[J].Asian Journal of Chemistry,2014,26(6):1631–1633.

[15] BERHANE T M,LEVY J,KREKELER M P S,et al.Adsorption of bisphenol A and ciprofloxacin by palygorskite-montmorillonite:effect of granule size,solution chemistry and temperature[J].Applied Clay Science,2016,132–133:518–527.

[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.3–2016 食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2017:1–2.

[17] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 5009.6–2016 食品中脂肪

的测定[S].北京:中国标准出版社,2017:1–2.

[18] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 5009.5–2016 食品中蛋白质的测定[S].北京:中国标准出版社,2017:1–3.

[19] YANG W L,CHEN Y P,CHENG Y F,et al.Effects of dietary zinc bearing palygorskite supplementation on the carcass traits,chemical composition of muscle and muscular lead and chromium contents of broilers[J].The Journal of Poultry Science,2017,54(1):34–40.

[20] 王晓明,王鹏,李伟明,等.夏季运输和休息时间对肉鸡应激及肌肉品质的影响[J].食品科学,2014,35(3):55–60.

[21] 周光宏.肉品加工学[M].北京:中国农业出版社,2008:106–110.

[22] 蒋雪樱,张相伦,陆鹏,等.蛋氨酸对肉鸡屠宰性能、肉品质及肌肉抗氧化的影响[J].食品科学,2016,37(21):114–118.

[23] PRYVULOVUC D,KOSARCIC S,POPOVIC M,et al.The influence of hydrated aluminosilicate on biochemical and haematological blood parameters,growth performance and carcass traits of pigs[J].Journal of Animal and Veterinary Advances,2012,11(1):134–140.

[24] KONG Y,WEI J X,WANG Z L,et al.Heavy metals removal from solution by polyaniline/palygorskite composite[J].Journal of Applied Polymer Science,2011,122(3):2054–2059.

[25] 周岩民,刘红艳,蒋正宇,等.不同粒度沸石对肉鸡生产性能、肠道菌群及组织重金属残留的影响[J].中国粮油学报,2009,24(6):84–88.

[26] 林飞宏.蒙脱石防治仔猪腹泻的效果及其机理探索[D].硕士学位论文.重庆:西南大学,2007:18–22.

[27] ZHOU P,TAN Y Q,ZHANG L,et al.Effects of dietary supplementation with the combination of zeolite and attapulgite on growth performance,nutrient digestibility,secretion of digestive

enzymes and intestinal health in broiler chickens[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2014,27(9):1311–1318.

[28] 孔泳,王志良,倪珺华,等.凹凸棒土应用于重金属离子吸附剂的研究[J].分析测试学报,2010,29(12):1224–1227.

[29] 张玉,王建庆.凹凸棒粘土对金属离子吸附性能的研究[J].染整技术,2013,35(5):31–34.

[30] 宋代军,王子苑,杨游,等.影响畜禽肉质的主要因素及其作用机制[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(11):26–33.

[31] 张茂华,蒋建明,陆金元.影响肉鸡色素沉积的因素[J].中国家禽,2006,28(7):56–57.

[32] 赵建明,张妮娅,魏金涛,等.复合吸附剂对饲料中有毒重金属的脱毒研究[J].中国粮油学报,2010,25(8):59–64.

[33] 刘悦,刘元法,王兴国,等.凹凸棒石脱色大豆油的热力学研究[J].食品科学,2008,29(12):164–167.

[34] XAVIER K C M,SANTOS M S F,OSAJIMA J A,et al.Thermally activated palygorskites as agents to clarify soybean oil[J].Applied Clay Science,2016,119:338–347.

[35] KAVAN B P,SHARGH M S,HASSANI S,et al.Effects of physical sizes of clinoptilolite on protein efficiency ratio,intestinal morphology and growth indices of broilers[J].Iranian Journal of Applied Animal Science,2014,4(1):165–172.

[36] 杨雪,冷智贤,颜瑞,等.凹凸棒石黏土对生长育肥猪生产性能、金属含量及肉品质的影响[J].中国粮油学报,2015,30(4):96–101.

[37] 罗有文,王龙昌,周岩民,等.沸石、凹凸棒石黏土对肉鸡抗氧化性能和组织胆固醇的影响[J].粮食与饲料工业,2006(12):37–39.

[38] 赵娣芳,韩成良,鲁红典.机械力化学效应在凹凸棒石/TiO_2复合颗粒制备中的应用研究[J].化工新型材料,2010,38(6):100–101,107.

Effects of Ultra-Fine Grinding Palygorskite on Muscle Quality of Broilers

DU Mingfang CHENG Yefei PEI Fuwei CHEN Lingjie WEN Chao ZHOU Yanmin*

(*College of Animal Science and Technology*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: This experiment investigated the effects of ultra-fine grinding palygorskite (Pal) on muscle quality of broilers. A total of 192 one-day-old Arbor Acres broilers were randomly divided into 3 groups with 8 replicates of 8 birds each. Broilers in the control group were fed a basal diet, and those in two experimental groups were fed the basal diet supplemented with 1% Pal in either regular grinding or ultra-fine grinding form for 42 days, respectively. The results showed as follows: Compared with the control group, neither regular grinding Pal nor ultra-fine grinding Pal supplementation did not significantly affect the muscular macrochemical components of broilers (P>0.05). Compared with the control group, the ultra-fine grinding Pal supplementation significantly decreased cadmium (Cd) and chromium (Cr) contents in the thigh muscle (P<0.05), significantly increased iron (Fe) content in the breast muscle (P<0.05), and significantly decreased redness value in the breast muscle and thigh muscle and yellowness value in the breast muscle (P<0.05); the regular grinding Pal supplementation only significantly reduced Cr content in the thigh muscle and redness value in the breast muscle when compared with those of broilers fed the basal diet (P<0.05). Additionally, broilers in the ultra-fine grinding Pal group exhibited a higher glutathione peroxidase activity in the breast muscle than the other two groups (P<0.05). The results suggest that the supplementation of ultra-fine grinding Pal can

*Corresponding author, professor, E-mail: zhouym6308@163.com

（责任编辑　菅景颖）

reduce the toxic heavy metal residues, affect the muscle color, and elevate the antioxidant capacity of the breast muscle, and it exerted more pronounced effects than regular grinding Pal.

Key words: ultra-fine grinding; regular grinding; palygorskite; broilers; macrochemical components; mineral accumulations; muscle quality; antioxidant capacity